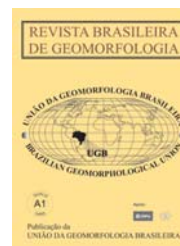




www.ugb.org.br  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 14, n° 2 (2013)



# FATORES CONTROLADORES DA EVOLUÇÃO DO RELEVO NO FLANCO NNW DO RIFT CONTINENTAL DO SUDESTE DO BRASIL: UMA ANÁLISE BASEADA NA MENSURAÇÃO DOS PROCESSOS DENUDACIONAIS DE LONGO-TERMO

## FACTORS CONTROLLING RELIEF EVOLUTION ON THE NNW FLANK OF THE CONTINENTAL RIFT OF SOUTHEASTERN BRAZIL: AN ANALYSIS BASED ON LONG-TERM DENUDATIONAL PROCESSES MEASUREMENT

**Éric Andrade Rezende**

Universidade Federal de Minas Gerais – Instituto de Geociências – Avenida Antônio Carlos, 6627 – Pampulha –  
Belo Horizonte, MG – CEP 31270-901  
E-mail: ear.88@hotmail.com

**André Augusto Rodrigues Salgado**

Departamento de Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais – Avenida Antônio  
Carlos, 6627 – Pampulha – Belo Horizonte, MG – CEP 31270-901  
E-mail: geosalgado@yahoo.com.br

**Juliana Rodrigues da Silva**

Universidade Federal de Minas Gerais – Instituto de Geociências – Avenida Antônio Carlos, 6627 – Pampulha –  
Belo Horizonte, MG – CEP 31270-901  
E-mail: jrs\_geo@yahoo.com.br

**Didier Bourlès**

Université d'Aix-Marseille III – Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement  
E-mail: bourles@cerege.fr

**Régis Braucher**

CNRS – Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement  
E-mail: braucher@cerege.fr

**Laetitia Léanni**

Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement  
E-mail: leanni@cerege.fr

## Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:  
01/04/2013

Data de Aprovação:  
04/06/2013

### Palavras-chave:

Evolução de escarpamentos;  
Isótopo cosmogênico  $^{10}\text{Be}$ ; Serra da Mantiqueira.

### Keywords:

Escarment evolution;  
 $^{10}\text{Be}$  cosmogenic nuclide;  
Mantiqueira Range.

## Resumo

O presente trabalho tem como objetivo estudar os fatores controladores da evolução do relevo de um trecho do interflúvio entre a bacia interiorana do rio Grande, um dos formadores do rio Paraná, e a bacia do rio Paraíba do Sul. Este divisor hidrográfico está contido em uma das porções mais elevadas da Serra da Mantiqueira e coincide com o flanco NNW do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil. Para este estudo foram selecionadas nove sub-bacias localizadas no extremo sul de Minas Gerais, entre os municípios de Itamonte e Bocaina de Minas. Essas sub-bacias tiveram suas taxas denudacionais estimadas pela mensuração da produção do isótopo cosmogênico  $^{10}\text{Be}$  em sedimentos fluviais. Os resultados mostram que a taxa média de denudação das sub-bacias do rio Paraíba do Sul, voltadas para o gráben (17,39 m/Ma), é superior a das sub-bacias dos rios Grande e Aiuruoca, voltadas para o interior continental (12,24 m/Ma). Entre os fatores controladores das taxas de denudação, se destaca a boa correlação existente entre as taxas e dois parâmetros morfométricos: amplitude de relevo e declividade média das sub-bacias. A influência da litologia também se mostra importante, já que a resistência dos granitos frente aos processos erosivos é um dos fatores que condiciona taxas denudacionais bastante baixas na área. Os resultados indicam que o granito Maromba é a unidade litológica mais resistente entre aquelas presentes nas sub-bacias amostradas. As baixas taxas mensuradas, referentes às últimas dezenas de milhares de anos, contrastam com o relevo rejuvenescido e com as elevadas altitudes desse setor da Mantiqueira, onde há um reconhecido papel da neotectônica na morfogênese. Deste modo, é provável que tenha

havido uma atenuação da atividade tectônica no Quaternário Superior, com a consequente estabilização dos níveis de base e diminuição dos processos denudacionais.

## Abstract

The present work aims to study the control factors of the relief evolution of a drainage divide section between the Grande river inland basin, one of the formers of the Paraná river, and the Paraíba do Sul river basin. This drainage divide is contained in one of the higher portions of Mantiqueira Mountain Range and coincides with NNW flank of the Continental Rift of Southeastern Brazil. For this study nine sub-basins were selected in the extreme south of Minas Gerais, between the municipalities of Itamonte and Bocaina de Minas. These catchments had their denudational rates estimated by measuring the production of cosmogenic nuclide  $^{10}\text{Be}$  in fluvial sediments. The results show that the average denudation rate of the sub-basins of the Paraíba do Sul river, facing the gráben (17,39 m/Ma), is greater than that of sub-basins of the Grande and Aiuruoca rivers, directed to continental interior (12,24 m/Ma). Among the control factors of the denudation rates, stands out a good correlation between rates and two morphometric parameters: relief amplitude and average slope of the catchments. The influence of lithology is also important, since the resistance of granite to erosion processes is one of the factors conditioning denudational rates fairly low in the area. The results indicate that the Maromba granite is the more resistant lithological unit among those present in the sampled sub-basins. The low rates measured, concerning the last tens of thousands of years, contrasts with the rejuvenated relief and with the high altitudes of this sector of the Mantiqueira Range, where there is a recognized role of neotectonics in morphogenesis. In this way, it is likely that there was an attenuation of tectonic activity in the Upper Quaternary, with the consequent stabilization of base levels and decrease of denudational processes.

## Introdução

Nos últimos anos uma série de trabalhos tem utilizado a mensuração de processos denudacionais por meio de isótopos cosmogênicos em estudos que tratam da evolução de escarpas associadas a margens passivas maduras (FLEMING *et al.*, 1999; COCKBURN *et al.*, 2000; BIERMAN & CAFFEE, 2001; HEIMSATH *et al.*, 2006; KOUNOV *et al.*, 2007; VANACKER *et al.*, 2007; SULLIVAN, 2007; MARENT, 2011). Contudo, são praticamente inexistentes investigações dessa natureza em riftes continentais que não evoluíram para abertura oceânica. A raridade de trabalhos enfocando esses ambientes tectônicos que expressam o primeiro estágio de

extensão crustal também é mencionada por Vogt *et al.* (1995), que ainda classificam os riftes continentais como objetos primordiais para o estudo da interferência entre a dinâmica tectônica e os processos exógenos.

Em parte do sudeste brasileiro a configuração geomorfológica típica de margens passivas é perturbada pela ocorrência de uma série de depressões tectônicas cenozóicas paralelas à costa que foram reunidas por Riccomini (1989) sob a denominação de *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). A formação do RCSB gerou um quadro geomorfológico peculiar em seu segmento central, criando um duplo escarpamento na margem continental (HIRUMA *et al.*, 2010). O flanco NNW do RCSB, representado pela Serra da

Mantiqueira, atua como divisor hidrográfico entre a bacia interiorana do rio Grande (Paraná) e a bacia do rio Paraíba do Sul, que se encontra alojada no gráben homônimo. Já o flanco SSE, representado pela Serra do Mar, coincide com o divisor entre a bacia do rio Paraíba do Sul e as pequenas bacias que drenam diretamente para o Oceano Atlântico.

Nesse contexto, o presente trabalho objetiva contribuir para uma melhor compreensão do processo de evolução do relevo de um trecho do flanco NNW do RCSB, adjacente à bacia sedimentar de Resende. Esta contribuição ocorrerá por meio de um estudo baseado na mensuração dos processos denudacionais de longo-termo ( $10^4$ - $10^5$  anos) por meio da uti-

lização do isótopo cosmogênico  $^{10}\text{Be}$  em sedimentos fluviais. Pretende-se principalmente discutir os fatores controladores das taxas de denudação, que correspondem aos parâmetros ambientais que podem influenciar as taxas de erosão em escala milenar (PORTENGA & BIERMAN, 2011). A área de estudo está localizada no extremo sul de Minas Gerais, entre os municípios de Itamonte e Bocaina de Minas (Figura 1). Para este estudo foram selecionadas nove sub-bacias contíguas ao tríplice divisor hidrográfico entre as bacias dos rios Grande, Aiuruoca e Paraíba do Sul. Este divisor de águas está contido em uma das porções mais elevadas da Serra da Mantiqueira, na região do Parque Nacional do Itatiaia.

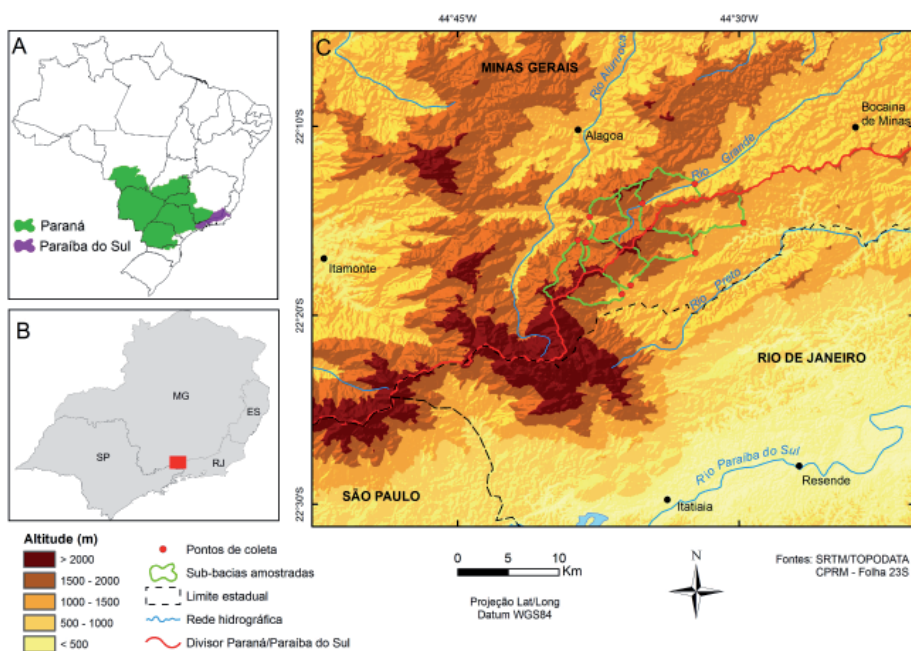


Figura 1 – Localização da área de estudo.

A: Mapa do Brasil com a localização das bacias dos rios Paraná (verde) e Paraíba do Sul (roxo); B: Localização da área de estudo na região sudeste; C: Contexto geomorfológico regional, com a depressão do médio Paraíba do Sul (gráben) a sudeste e o planalto do alto rio Grande (vertente interiorana) a noroeste. O conjunto de terras altas entre esses dois compartimentos corresponde à Serra da Mantiqueira.

## Caracterização da área de estudo

A área de estudo está inserida na Província Mantiqueira, desenvolvida durante a Orogenia Neoproterozóica Brasileiro-Pan Africana, a qual resultou na amalgamação do Paleocóntinente Gondwana Ocidental (HEILBRON *et al.*, 2004). De acordo com Trouw *et al.* (2003), a porção da Serra da Mantiqueira abordada no presente trabalho situa-se ao sul do Cráton do São Francisco, na zona de interferência entre as faixas móveis neoproterozóicas Brasília (N-S) e Ribeira (NE-SW). Conforme a Figura 2, as unidades pré-cambrianas da região são compostas pelo embasamento contendo ortogneisses de idade paleoproterozóica, metassedimentos neoproterozóicos da Megassequência Andrelândia, além de vários granitos gerados por anatexia, também neoproterozóicos (TROUW *et al.*, 2003).

Este trecho da Serra da Mantiqueira tem como peculiaridade o fato de sua face sudeste apresentar um escalonamento composto por dois degraus paralelos de direção NE-SW (Figura 1C). Uma primeira escarpa separa

a depressão do médio Paraíba do Sul (400-500m), onde está alojada a Bacia de Resende, de um patamar intermediário constituído pela alta bacia do rio Preto (1000-1200m). A noroeste deste patamar intermediário ergue-se uma segunda escarpa com altura próxima dos 1000m (Figuras 1 e 3). Este escarpamento é caracterizado pela alternância entre reentrâncias, onde alojam-se os principais cursos fluviais, e saliências, marcadas por divisores de topos alongados e angulosos. O topo da escarpa superior, localmente posicionado entre 1600 e 2250m de altitude, possui morfologia convexa a aguçada e abriga o divisor hidrográfico entre as bacias dos rios Grande (Paraná) e Paraíba do Sul. Este divisor, que no Maciço do Itatiaia ultrapassa os 2500m de altitude, decai progressivamente em direção a nordeste, raramente superando 1600m a leste da área de estudo. O reverso da escarpa superior corresponde à vertente interiorana da Serra da Mantiqueira, estando sua porção ocidental, vizinha ao Maciço do Itatiaia, drenada por afluentes do rio Aiuruoca, enquanto a porção oriental abriga as nascentes do Rio Grande (Figuras 1 e 3).

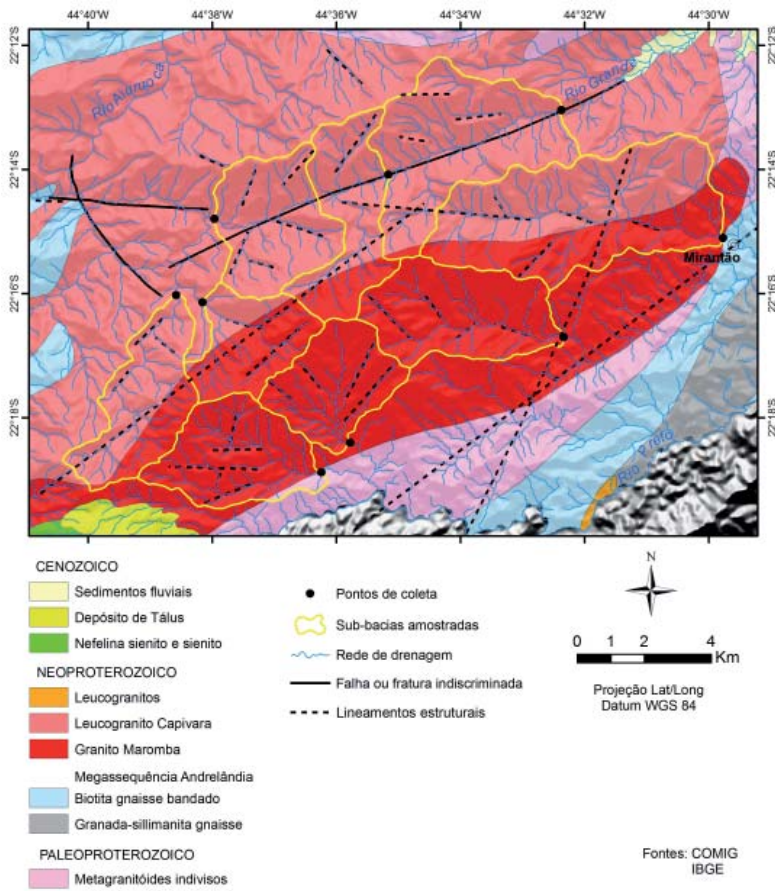
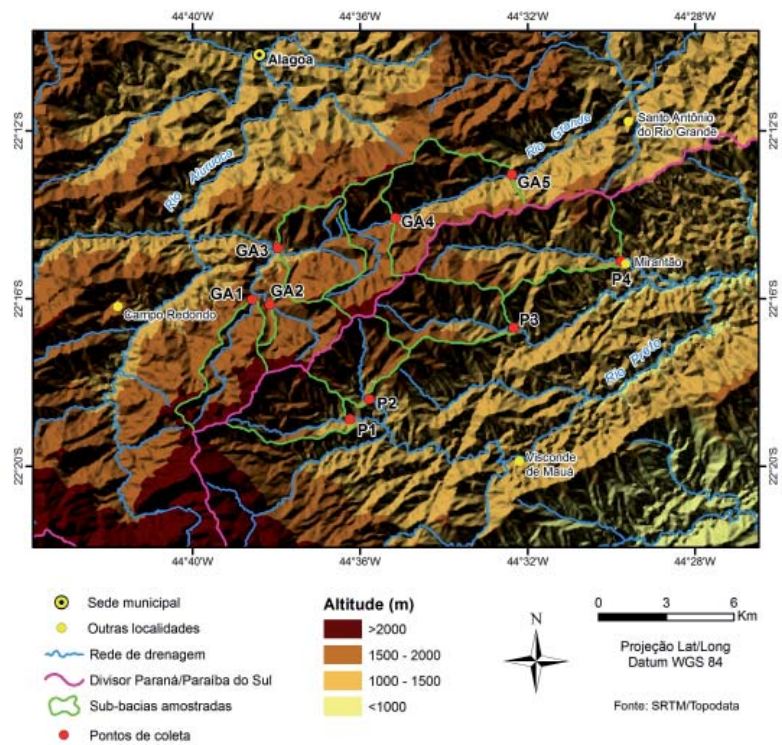


Figura 2 – Mapa geológico das sub-bacias amostradas e adjacências.

Obs.: A extremidade SSE da área não foi mapeada pelo Projeto Sul de Minas (PEDROSA SOARES et al., 2003) por estar inserida no estado do Rio de Janeiro.

Figura 3 – Modelo digital de elevação hipsométrico e localização das sub-bacias amostradas. Códigos dos pontos de amostragem: P=Sub-bacias do rio Paraíba do Sul; GA=sub-bacias dos rios Aiuruoca e Grande. O nome do curso fluvial principal de cada sub-bacia está na Tabela 1.



De acordo com Sant'Anna Neto (2005), a Serra da Mantiqueira é uma das áreas do sudeste brasileiro onde a altitude atua como fator de "abrandamento" do caráter tropical do clima e ainda exerce importante papel na distribuição espacial das chuvas. Dados fornecidos pela estação meteorológica do Alto Itatiaia indicam que a precipitação pluviométrica média anual é de 2419mm, sendo concentrada na primavera-verão. No entanto, a diminuição da pluviosidade nos três meses mais frios (junho, julho e agosto) não é suficiente para definir uma estação seca. A temperatura média anual registrada na mesma estação é de 11,5°C (MODENESI-GAUTTIERI & NUNES, 1998). Segundo Santos (2000), ocorrem basicamente dois tipos de vegetação na área das sub-bacias amostradas: (i) Floresta Ombrófila Densa Alto-montana e (ii) Campos e Arbustais de Altitude.

## Métodos

Foram selecionadas nove sub-bacias para mensuração de suas taxas denudacionais de longo-termo por meio da utilização do isótopo cosmogênico  $^{10}\text{Be}$ . Destas, cinco se localizam na vertente interiorana e quatro na vertente voltada para o gráben do Paraíba do Sul (Figura 3). Na vertente interiorana, dois dos pontos de coleta estão localizados no rio Grande e três em afluentes do rio Aiuruoca. Todos os cursos fluviais amostrados na vertente voltada para o gráben são afluentes do rio Preto. Os critérios para a seleção foram: sub-bacias localizadas preferencialmente junto ao divisor Paraná/Paraíba do Sul e com área semelhante nos dois lados deste; baixa interferência antrópica; presença significativa de quartzo no substrato geológico e existência de acesso aos pontos de coleta.

Para análise do isótopo cosmogênico  $^{10}\text{Be}$ , foram coletadas cerca de 500g de sedimentos fração areia no centro dos canais fluviais amostrados. Estes sedimentos foram então encaminhados ao Laboratório de Geomorfologia da Universidade Federal de Minas Gerais, onde foram peneirados, tendo sido selecionados cerca de 70g de grãos de quartzo na granulometria entre 0,25 e 1mm. Os grãos de quartzo selecionados foram lavados, secados e, em seguida, purificados pela adição de uma solução de 100ml dos ácidos HCl (50%) e  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  (50%). Após esta etapa as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Isótopos Cosmogênicos do Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE) na França onde, por meio de três adições sequenciais de 20ml de HF puro com intervalos de 24 horas entre cada adição, foi eliminado o  $^{10}\text{Be}$  atmosférico. Após isso, em cada amostra foram adicionados 0,3ml de  $^9\text{Be}$  que serviu como elemento traçador. As amostras então foram solubilizadas em HF puro. Extrações químicas sucessivas

com base em solventes e ácidos ( $\text{HNO}_3$ ) permitiram a recuperação do  $^9\text{Be}$  e do  $^{10}\text{Be}$  dissolvidos na solução de HF. Após esta etapa, o  $^{10}\text{Be}$  foi mensurado em espectrômico de massas. A mensuração da relação entre  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  foi calibrada segundo The National Institute of Standards and Technology (NIST). Para validação dos resultados foi utilizado o padrão internacional SRM 4325  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  ( $26,8 \pm 1,4$ ) x  $10^{-12}$ .

A área total das sub-bacias e a área de cada unidade litotípica nelas inseridas foram calculadas no *software* ArcGis 9.3. O perfil longitudinal do curso d'água principal de cada sub-bacia amostrada foi gerado por meio de imagem SRTM/Topodata, traçando-se da nascente até o ponto de coleta. Posteriormente os dados foram tratados em planilha eletrônica, onde foram então produzidos os gráficos finais. Essas mesmas ferramentas foram empregadas para obtenção e organização dos dados referentes à altitude média, declividade média e amplitude de relevo. No caso desta última foi considerada a diferença de altitude do ponto mais alto de cada sub-bacia em relação ao seu respectivo ponto de coleta.

As taxas de denudação obtidas por meio da mensuração do  $^{10}\text{Be}$  foram analisadas em conjunto com os produtos cartográficos, imagens de satélite, gráficos, tabelas, perfis longitudinais e observações de campo. Procurou-se estabelecer relações entre esses dados de modo a obter os possíveis fatores controladores das taxas de denudação, bem como os principais processos geomorfológicos atuantes na área de estudo. Nessas análises também foram de grande valia as correlações feitas com trabalhos anteriores que abordaram a evolução geológico-geomorfológica da Serra da Mantiqueira e áreas adjacentes, assim como com aqueles que utilizaram a mensuração de processos denudacionais através de isótopos cosmogênicos em outras áreas.

## Resultados e discussões

### Taxas de denudação mensuradas

A Tabela 1 apresenta os resultados analíticos das taxas de denudação (em metros por milhão de anos) calculadas por meio da mensuração do isótopo cosmogênico  $^{10}\text{Be}$  em sedimentos fluviais. As taxas das sub-bacias do rio Grande/Paraná, voltadas para o interior continental, variam entre 7,55 m/Ma e 14,75 m/Ma, com uma média de 12,24 m/Ma. Já as taxas das sub-bacias do rio Paraíba do Sul, voltadas para o gráben, variam entre 12,06 m/Ma e 26,5 m/Ma, com uma média de 17,39 m/Ma. Ou seja, a taxa média das sub-bacias voltadas para o gráben é 1,42 vezes superior à taxa média das sub-bacias interioranas.

**Tabela 1 – Taxas de denudação e dados morfométricos das sub-bacias amostradas**

Ponto de amostragem	Curso fluvial	Vertente	Bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Altitude média (m)	Amplitude de relevo (m)	Declividade média (%)	<sup>10</sup> Be (10 <sup>5</sup> at/g)	Idade de exposição (ka)	Taxa de denudação (m/Ma)
GA1	Cór. da Capivara	Interiorana	A	10,55	1924	674	33,1	5,81 ± 0,21	44,3	14,35 ± 0,52
GA2	Cór. do Brejo/ Monte Belo	Interiorana	A	8,07	1917	679	33,3	10,65 ± 0,36	82,4	7,55 ± 0,25
GA3	Rib. Dois Irmãos	Interiorana	A	11,21	1719	719	40,8	4,97 ± 0,16	43,5	14,75 ± 0,46
GA4	Rio Grande	Interiorana	G	10,36	1855	770	38,3	7,81 ± 0,24	62,7	10,05 ± 0,31
GA5	Rio Grande	Interiorana	G	28,29	1703	1007	43,0	4,75 ± 0,18	42,6	14,53 ± 0,50
P1	Cór. do Morro Cavado	Gráben	PS	10,96	1753	958	39,6	2,88 ± 0,09	24,5	26,50 ± 0,85
P2	Rib. Santa Clara	Gráben	PS	9,3	1747	960	42,3	5,75 ± 0,19	49,5	12,91 ± 0,43
P3	Rib. das Flores	Gráben	PS	12,99	1651	1119	46,8	3,91 ± 0,13	35,8	18,09 ± 0,58
P4	Rib. da Prata	Gráben	PS	23,93	1473	1076	42,2	4,88 ± 0,15	51,4	12,06 ± 0,52

Bacias: A – rio Aiuruoca; G – rio Grande; PS – rio Paraíba do Sul.

Outra forma de comparar as taxas de denudação mensuradas em ambas vertentes do divisor é por meio de pares de sub-bacias contíguas e de área semelhante. Nessa perspectiva, as sub-bacias do rio Paraíba do Sul: P1, P2 e P3 possuem taxas superiores respectivamente a: GA1, GA2 e GA4, sendo estas localizadas no lado oposto do divisor (Tabela 1 e Figura 3). Apenas uma sub-bacia localizada na vertente interiorana, a GA5, apresentou taxa superior a sua vizinha imediata, a P4. A sub-bacia GA3 não foi incluída nesta comparação por pares por não estar localizada junto ao divisor principal.

Estas comparações poderiam, a princípio, confirmar um processo de retração do escarpamento rumo ao interior, acompanhado pelo acréscimo de área da bacia do rio Paraíba do Sul em detrimento à bacia do rio Grande (Paraná). Deste modo, os dados apresentados não comprovariam a tendência atual de migração do divisor regional em direção ao oceano, conforme sugerido por Santos (1999). De acordo com essa autora, o soerguimento diferenciado dos grandes blocos e a acentuação do basculamento destes para NW promoveria o rearranjo das altas bacias, sendo que áreas das bacias dos rios Grande e Preto seriam incorporadas à bacia do rio Aiuruoca.

No entanto, a evolução deste divisor se mostra bastante complexa, como indica o fato de duas das sub-bacias do rio Paraíba do Sul (P2 e P4) apresentarem taxas inferiores às de três sub-bacias do rio Grande/Paraná (GA1, GA3 e GA5). Isso mostra que a ocorrência de taxas denudacionais mais elevadas no escarpamento voltado para o gráben não é um fenômeno generalizado e ainda sugere que as taxas foram fortemente influenciadas por fatores locais como, por exemplo, a litologia.

A diferença relativamente reduzida entre as taxas de denudação verificadas nas duas bacias hidrográficas certamente está relacionada ao fato de o divisor regional estar localizado no topo de uma crista pronunciada, o que cria gradientes bastante elevados em ambas as vertentes e não apenas naquela voltada para o gráben. Esta configuração é uma das peculiaridades da área de estudo em relação ao aspecto típico

de ambientes associados à tectônica extensional, já que não há apenas um degrau no relevo, mas verdadeiras escarpas nos dois lados do divisor. Contribui ainda para este quadro o escalonamento local da Serra da Mantiqueira, que cria um nível de base intermediário localizado no vale suspenso do alto rio Preto. Ou seja, os cursos fluviais amostrados voltados para o gráben não são afluentes diretos do rio Paraíba do Sul, e sim, de um curso fluvial tributário que estabelece um nível de base topograficamente mais elevado.

A comparação entre as taxas denudacionais do rio Grande (GA4 e GA5) e dos afluentes do rio Aiuruoca (GA1, GA3 e GA2) não mostra um padrão claro de diferenciação entre estas duas bacias, atingindo em ambas a casa dos 14 m/Ma (Tabela 1). Porém, se forem comparadas somente as taxas de duas sub-bacias contíguas e de área semelhante, a dinâmica deste divisor fica mais evidente. Neste caso o ribeirão Dois Irmãos (GA3), afluente direto do Rio Aiuruoca, apresenta taxa de 14,75 m/Ma, enquanto a sub-bacia do rio Grande (GA4) possui taxa de 10,05 m/Ma. Portanto, a progressiva subtração das áreas de cabeceira do rio Grande pelo rio Aiuruoca, já observada por Santos (1999), é corroborada pelas taxas de denudação mensuradas neste trabalho.

Chama atenção ainda o fato de as taxas de denudação serem relativamente baixas, atingindo uma média geral de apenas 14,53 m/Ma, apesar do contexto geomorfológico e tectônico no qual as sub-bacias estão inseridas. Este valor é muito inferior tanto à média (218 m/Ma) quanto à mediana (54 m/Ma) globais, calculadas por Portenga & Bierman (2011) a partir de uma compilação de taxas de denudação obtidas através do <sup>10</sup>Be em bacias hidrográficas de várias partes do mundo. Do mesmo modo, a média de 17,39 m/Ma encontrada nas sub-bacias do rio Paraíba do Sul está bem abaixo das taxas estimadas por Moreira *et al.* (2012) para o recuo da borda de falha da Bacia de Resende, localizada a SSE das sub-bacias amostradas. Estes autores estimaram por meio de modelos matemáticos taxas entre 125 e 250 m/Ma para o recuo erosivo dessa borda escarpada.

## Fatores controladores

### Área das bacias amostradas

Conforme pode ser observado na Tabela 1 e na Figura 4, ocorre apenas parcialmente uma correlação positiva entre a área das sub-bacias e suas respectivas taxas de denudação. Logo, não é possível estabelecer um padrão geral. De modo mais específico é possível observar que nas sub-bacias dos rios Grande e Aiuruoca quanto maior a área, maior a taxa de denudação, embora não haja uma proporção direta entre essas duas variáveis (Figura 4). Entre as sub-bacias do Paraíba do Sul, a de menor área apresenta também a menor taxa de denudação (P2), não havendo nenhuma correlação semelhante nas demais. Estas observações se aproximam dos resultados encontrados por Cherem *et al.* (2012) que, utilizando-se da mesma ferramenta para a mensuração dos processos erosivos nos escarpamentos de Cristiano Otoni e São Geraldo em Minas Gerais, verificaram uma correlação positiva entre taxas de denudação e área apenas em parte das sub-bacias por eles amostradas. Por outro lado, Marent (2011) não encontrou relação entre taxas de denudação ( $^{10}\text{Be}$ ) e área de bacias na Serra do Mar paranaense. O mesmo ocorreu com Salgado *et al.* (2012) no divisor entre as bacias dos rios Paraná e Doce em Minas Gerais, com Roller *et al.* (2012) nas Montanhas Rwenzori (Rifte Albert – África) e com Matmon *et al.* (2003) nas Montanhas Great Smoky (EUA).

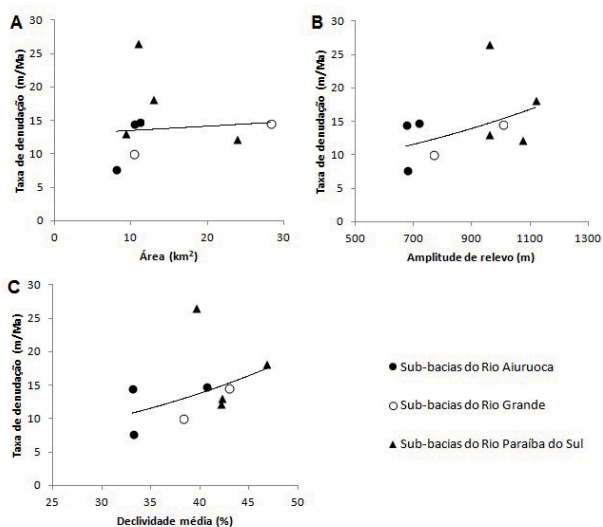


Figura 4 – Relação entre taxas de denudação e variáveis morfológicas das bacias amostradas. A: Área das sub-bacias (km<sup>2</sup>); B: Amplitude de relevo (m); C: Declividade média (%).

Essa correlação parcial entre taxas denudacionais e área das sub-bacias poderia indicar um maior poder erosivo dos canais fluviais que possuem áreas de contribuição mais extensas. No entanto, os dados apresentados são insuficientes para se chegar a uma conclusão, sendo provável que a dimensão das sub-bacias não seja um fator controlador das taxas de denudação na área de estudo. Esta ausência de controle

provavelmente está relacionada à variação relativamente pequena na extensão das sub-bacias amostradas (8,07 a 28,29 km<sup>2</sup>), sendo que todas elas podem ser consideradas pequenas bacias de cabeceira. Deste modo, não é possível comprovar na área de estudo a ocorrência de processos erosivos mais intensos em bacias hidrográficas menores e mais próximas das cabeceiras, como observado em escala global por Milliman e Syvitski (1992) e em escala local por Salgado *et al.* (2007).

### Amplitude de relevo

Conforme mostram a Tabela 1 e a Figura 4, há uma correlação bastante expressiva, embora não generalizada, entre amplitude de relevo e taxas de denudação, ou seja, o aumento da primeira tende a ser acompanhado pelo acréscimo da última. Nas sub-bacias interioranas - bacias dos rios Grande e Aiuruoca - a amplitude de relevo varia entre 674m e 1007m, apresentando uma média de 770m. Já nas sub-bacias do rio Paraíba do Sul a amplitude de relevo varia entre 958 m e 1119m, com uma média de 1028m. Portanto, a amplitude de relevo média das sub-bacias voltadas para o gráben é 1,34 vezes maior do que a das sub-bacias dos rios Grande e Aiuruoca, estando essa relação bastante próxima da existente entre as taxas de denudação desses dois compartimentos (1,42).

O fato de haver proporcionalidade entre a taxa de denudação média e a amplitude de relevo média encontradas nas duas vertentes do divisor regional reflete a existência de dois sistemas denudacionais distintos. Cada um desses sistemas é comandado por um nível de base, sendo que aquele voltado para o gráben é altimetricamente mais baixo e com taxas denudacionais, em média, mais elevadas. Tal fato confirma a importância do nível de base para a determinação das taxas erosivas e denudacionais. Vale ressaltar que uma correlação positiva entre relevo e taxas de denudação em escarpas também foi encontrada por Roller *et al.* (2012), Cherem *et al.* (2012) e Salgado *et al.* (2012). Por outro lado, Matmon *et al.* (2003) e Marent (2011) encontraram uma baixa relação de dependência entre estas duas variáveis, tendo sido esse último trabalho realizado em uma área marcada pela erosão diferencial entre granitos e migmatitos.

### Declividade média e perfis longitudinais

De acordo com von Blanckenburg (2006), a declividade é um parâmetro que exerce um controle sobre as taxas denudacionais muito mais significativo do que a amplitude de relevo de uma bacia. Portenga & Bierman (2011) também afirmam que, em escala global, a declividade média das bacias possui a mais forte correlação bivariada com as taxas de erosão obtidas pela mensuração do  $^{10}\text{Be}$ . Resultados de um estudo realizado na Sierra Nevada por Riebe *et al.* (2000) mostram que o grau de correlação entre taxas de denudação e declividade das vertentes depende do equilíbrio erosivo do relevo. Na ausência de rejuvenescimento da paisagem por rebaixamento do nível de base, as taxas erosivas podem ser desvinculadas da declividade. Já na proximidade de escarpas de falha e cânions essa correlação tende a se intensificar.

Nas sub-bacias amostradas, embora a variação na declividade média seja relativamente reduzida (33,1% a 46,8%), há uma correlação positiva entre este parâmetro e as taxas de denudação (Figura 4). No entanto, a exemplo do que ocorre com a amplitude de relevo, esta relação não se aplica a todas sub-bacias, como pode ser verificado pela comparação entre GA1 e GA2 ou entre P1 e P2 (Tabela 1), pares de sub-bacias com declividade média muito semelhante, mas com taxas de denudação discrepantes. Outros trabalhos realizados em zonas escarpadas também observaram uma relação entre taxas de denudação ( $^{10}\text{Be}$ ) e declividade média de bacias, como os de Matmon *et al.* (2003), Vanacker *et al.* (2007), Marent (2011), Roller *et al.* (2012), Cherem *et al.* (2012) e Salgado *et al.* (2012).

Ao contrário do que seria o esperado, devido à diferença altimétrica entre os níveis de base, em algumas sub-bacias dos rios Aiuruoca (GA3) e Grande (GA4 e GA5) a declividade média é semelhante ou até superior à encontrada nas sub-bacias voltadas para o gráben. Este fato está relacionado à configuração dessas três sub-bacias interioranas, que abrangem não só a encosta voltada para NNW, adjacente ao divisor, mas também uma declivosa vertente voltada para SSE, localizada no lado oposto de seus vales principais. Assim, a média deste parâmetro nas sub-bacias do rio Paraíba do Sul (42,7%) é apenas 1,13 vezes superior àquela encontrada nas sub-bacias dos rios Grande e Aiuruoca (37,7%), o que resulta em uma relação inferior à existente entre as taxas de denudação destes dois compartimentos (1,42). Estas observações também refletem o fato do divisor regional estar localizado no topo de uma crista, com declives acentuados em ambas as vertentes, e não em uma borda planáltica, onde apenas uma das vertentes é escarpada.

A pronunciada incisão da rede de drenagem na área de estudo indica que a dissecação é certamente responsável por uma considerável parcela dos processos denudacionais ali atuantes. Seidl *et al.* (1997) afirmam que a incisão do canal atua como uma condição limite para o desenvolvimento das encostas e, como tal, fornece um vínculo entre evolução da paisagem e nível de base. Deste modo, visando complementar a correlação entre declividade média e taxas de denudação, é importante analisar os perfis longitudinais dos canais principais de cada sub-bacia, já que estes expressam o gradiente de cada curso fluvial e conseqüentemente seu potencial erosivo.

Conforme mostra a Figura 5, a diferença entre os níveis de base fica mais evidente nos perfis longitudinais do que na declividade média das sub-bacias (Tabela 1 e Figura 4). Os cursos fluviais voltados para o gráben do Paraíba do Sul, notadamente os ribeirões Santa Clara (P2) e das Flores (P3), possuem perfis côncavos, com elevado gradiente e sem grandes irregularidades. Apenas no ribeirão da Prata (P4) há uma ruptura de declive considerável, localizada próxima a um expressivo lineamento estrutural de direção NNE-SSW

e possivelmente associada a este. Já os perfis dos cursos fluviais interioranos possuem menor gradiente e maior número de anomalias. Nos córregos da Capivara (GA1) e do Brejo (GA2) e no rio Grande (GA4 e GA5) as principais rupturas de declive coincidem aproximadamente com um lineamento de direção NE-SW localizado no escarpamento interiorano. No caso do córrego do Brejo a ruptura também está próxima do contato entre o Granito Maromba e o Leucogranito Capivara. Já no ribeirão Dois Irmãos (GA3) a ruptura de declive está associada a um *knickpoint* localizado na base da encosta voltada para SSE, na qual está localizada sua principal nascente.

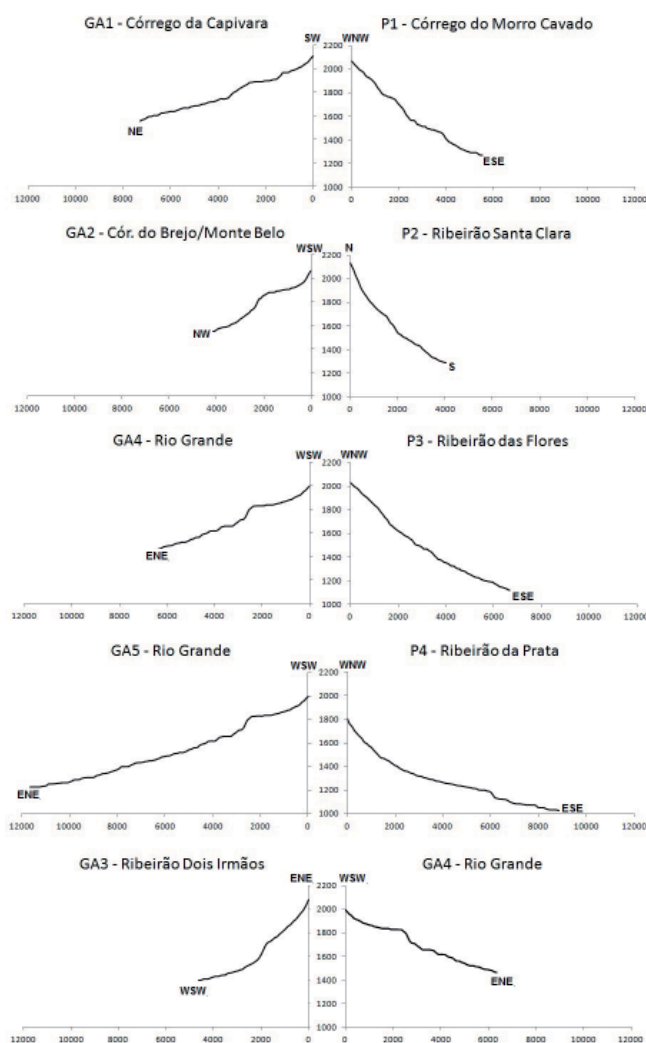


Figura 5 – Perfis longitudinais dos canais principais de cada sub-bacia amostrada.

Eixo X: extensão (m); eixo Y: altitude (m). Nas extremidades dos perfis foi inserida a direção inicial e final de cada canal.

Obs: Por não estar localizado junto ao divisor Paraná/Paraíba do Sul, o perfil da sub-bacia GA3 foi colocado ao lado da G4, de modo a permitir a comparação entre o rio Grande e um afluente direto do rio Aiuruoca.



Os perfis das sub-bacias do rio Paraíba do Sul estão mais próximos de uma conformação logarítmica que, segundo Etchebehere *et al.* (2011), é uma característica de cursos d'água mais equilibrados. O gradiente mais elevado desses perfis é parcialmente refletido em taxas denudacionais mais elevadas, como ocorre no córrego do Morro Cavado e no ribeirão das Flores. No entanto, o ribeirão Santa Clara apesar de possuir o perfil longitudinal mais declivoso entre todas as sub-bacias, apresentou uma taxa de denudação de apenas 12,91 m/Ma, o que pode indicar uma tendência de equilíbrio, na qual os processos erosivos são atenuados.

Nas sub-bacias do rio Grande/Paraná os gradientes são mais modestos, o que certamente exerce influência nas taxas de denudação mais baixas ali observadas. Por outro lado, há nitidamente um maior encaixamento dos vales a jusante das rupturas de declive, o que poderia indicar a ocorrência de taxas denudacionais mais elevadas nessas *knickzones* próximas às cabeceiras, semelhantemente ao observado por Abbühl *et al.* (2010) nos Andes peruanos. Gallen *et al.* (2011) também afirmam que a migração de *knickpoints* é um dos mecanismos pelo qual os canais podem entalhar a rocha, transmitir as mudanças no nível de base para as encostas e até para os divisores de drenagem. Portanto, é possível que a retração de *knickpoints* seja responsável por parcela considerável dos processos denudacionais atuantes em algumas das sub-bacias amostradas, marcadamente nas interioranas, onde as rupturas de declive são mais expressivas.

Com relação à comparação Aiuruoca/Grande é possível observar que o ribeirão Dois Irmãos, afluente direto do rio Aiuruoca, apresenta perfil longitudinal com maior gradiente do que o rio Grande (Figura 5). Esta diferença reflete a incisão mais acentuada do ribeirão Dois Irmãos e aparenta ser um dos fatores responsáveis por essa bacia apresentar uma taxa de denudação mais elevada do que a verificada no rio Grande.

### Litotipos

Nas sub-bacias estudadas estão presentes basicamente duas unidades litológicas: o granito Maromba e o leucogranito Capivara (Figura 2). Há ainda uma pequena ocorrência de ortognaisses migmatíticos do embasamento. Conforme observado na Tabela 2 há uma boa correlação entre a composição litológica das sub-bacias e suas taxas de denudação, o que explica parte das incongruências encontradas nas relações entre amplitude/declividade e taxas denudacionais (Figura 4).

**Tabela 2 – Participação percentual de cada unidade litológica em relação à área total das sub-bacias e taxas de denudação**

Ponto	Curso fluvial	LGC	GM	EM	Taxa de denudação (m/Ma)
GA1	Córrego da Capivara	73,3	26,7	-	14,35 ± 0,52
GA2	Córrego do Brejo/Monte Belo	26,7	73,3	-	7,55 ± 0,25
GA3	Ribeirão Dois Irmãos	100	-	-	14,75 ± 0,46
GA4	Rio Grande	74,4	25,6	-	10,05 ± 0,31
GA5	Rio Grande	89,7	10,3	-	14,53 ± 0,50
P1	Córrego do Morro Cavado	-	95,5	4,5	26,50 ± 0,85
P2	Ribeirão Santa Clara	-	100	-	12,91 ± 0,43
P3	Ribeirão das Flores	-	100	-	18,09 ± 0,58
P4	Ribeirão da Prata	60,5	39,5	-	12,06 ± 0,52

LGC: Leucogranito Capivara; GM: Granito Maromba; EM: Embasamento.

Fonte: porcentagens calculadas com base na folha Pouso Alto do Projeto Sul de Minas (1:100.000).

O melhor exemplo desta influência litológica é fornecido pela comparação entre as sub-bacias GA1 e GA2. A sub-bacia GA1 é composta por 73,3% de leucogranito Capivara e 26,7% de granito Maromba, enquanto na sub-bacia GA2 a proporção entre estas duas unidades litológicas é exatamente a oposta (Tabela 2). Como reflexo desta diferença a taxa de denudação da GA1 (14,35 m/Ma) é quase duas vezes maior que a da sua vizinha GA2 (7,55 m/Ma). Este fato corrobora a observação de Almeida (1996), segundo a qual o granito Maromba apresenta maior resistência à alteração em relação ao leucogranito Capivara.

A comparação entre os dois pontos de coleta no rio Grande também indica a maior resistência do Granito Capivara. Conforme a Tabela 2, no ponto mais a montante (GA4) a sub-bacia possui maior participação percentual de granito Capivara do que no ponto a jusante (GA5). Esta diferença se reflete na menor taxa de denudação da sub-bacia GA4 (10,05 m/Ma) em relação à GA5 (14,53 m/Ma). Ainda na escarpa interior nota-se que a maior taxa de denudação pertence à sub-bacia GA3, inteiramente constituída pelo leucogranito Capivara.

Entre as sub-bacias do rio Paraíba do Sul é possível notar na Tabela 2 que a ocorrência, mesmo que pequena, de ortognaisses do Embasamento na sub-bacia P1 aparenta ter influência em sua taxa de denudação (26,5 M/ma), a mais alta entre todas as sub-bacias amostradas. As sub-bacias P2 e P3, inteiramente compostas pelo granito Capivara apresentam taxas denudacionais de 12,91 m/Ma e 18,09 m/Ma respectivamente. Neste caso a diferença entre as taxas possivelmente

se relaciona aos parâmetros morfométricos anteriormente discutidos. Já a sub-bacia P4, embora seja constituída majoritariamente pelo leucogranito Capivara (60,5%), apresentou uma taxa de denudação de apenas 12,06 m/Ma e, portanto, não seguiu o padrão encontrado nas demais sub-bacias. Esta discrepância da sub-bacia P4 provavelmente está associada à sua morfologia bastante distinta das demais, sendo caracterizada por uma pronunciada reentrância no escarpamento e por altitudes mais modestas (Figuras 3 e 5).

Regionalmente é possível observar que tanto o granito Maromba quanto o leucogranito Capivara encontram-se altimetricamente ressaltados em relação aos gnaisses circundantes, constituindo os pontos mais elevados do divisor hidrográfico, após os maciços alcalinos do Itatiaia e de Passa-Quatro. Esta observação também é válida para outras porções da Serra da Mantiqueira, como a área de ocorrência do granito Marmelópolis, onde o Pico dos Marins ultrapassa 2400m de altitude. Portanto, a resistência destes granitos frente aos processos erosivos é certamente um dos motivos da ocorrência de taxas denudacionais relativamente baixas nas sub-bacias amostradas.

Os resultados apresentados se assemelham aos obtidos por Marent (2011), que demonstrou por meio da mensuração de taxas de denudação ( $^{10}\text{Be}$ ), a existência de erosão diferencial entre granitos e migmatitos na Serra do Mar paranaense. Deste modo, os dados apresentados no presente trabalho indicam que a litologia exerce um papel bastante relevante como fator controlador das taxas denudacionais. No entanto, a influência desse fator não pode ser analisada de forma isolada, devendo-se considerar também os demais parâmetros ambientais envolvidos. Vale ressaltar que, embora a importância da erosão diferencial tenha sido observada em outras áreas do globo (SALGADO *et al.*, 2008; PALUMPO *et al.*, 2009), a sua constatação em ambiente tropical úmido, com presença de morfologia escarpada e associada à rifteamento, merece destaque.

## Clima

A correlação entre taxas denudacionais e fatores climáticos é algo ainda controverso na literatura geomorfológica. Por meio de uma compilação de taxas de denudação, mensuradas através de isótopos cosmogênicos em bacias hidrográficas sob diferentes regimes climáticos, von Blanckenburg (2006) sugere que a denudação não se correlaciona com os atuais índices de precipitação e temperatura anual médias. Em estudo na Califórnia, Binnie *et al.* (2010) também citam que não há relação aparente entre taxas de denudação ( $^{10}\text{Be}$ ) e precipitação. Por outro lado, Abbühl *et al.* (2011) encontraram uma correlação positiva entre taxas de denudação ( $^{10}\text{Be}$ ) e índices pluviométricos no escarpamento ocidental dos Andes e Matmon *et al.* (2003) sugerem que um efeito orográfico influencia as taxas de erosão das Montanhas Great Smoky.

A inexistência de dados em escala de detalhe e a própria variabilidade climática natural não permitem que seja feita uma correlação quantitativa direta entre as taxas de denudação e dados climáticos na área de estudo. No entanto, conforme já exposto, a Serra da Mantiqueira exerce importante papel na distribuição espacial das chuvas através de efeitos orográficos. Devido à proximidade entre as sub-bacias amostradas, o efeito da sombra de chuva na vertente interiorana deve ser relativamente reduzido, porém, não desprezível. Um indicativo deste efeito é a inexistência de campos de altitude na vertente a barlavento, onde há predomínio absoluto de uma densa cobertura florestal, enquanto nas porções mais elevadas da vertente interiorana as formações campestres são abundantes. Portanto, é possível que a maior pluviosidade da vertente voltada para o gráben tenha alguma influência nas taxas denudacionais ali verificadas, que são em média mais elevadas.

Outro indicativo de uma possível influência climática nas taxas de denudação é a considerável diferença existente entre as taxas de dois pares de sub-bacias vizinhas e morfometricamente muito semelhantes. Esses dois pares correspondem a GA1 e GA2, na bacia do rio Grande/Paraná e PS1 e PS2, na bacia do rio Paraíba do Sul. Em ambos os casos a sub-bacia localizada mais próxima do maciço do Itatiaia (GA1 e PS1) possui uma taxa aproximadamente duas vezes maior que a sua vizinha (Tabela 1). Embora esta diferenciação possa ser explicada parcialmente por variações litológicas, é possível que a proximidade do maciço e conseqüentemente o maior índice pluviométrico também tenham alguma influência, principalmente pela ocorrência mais intensa de movimentos de massa nos arredores deste.

Com relação ao quadro paleoclimático no Quaternário Superior, Behling *et al.*, (2002) afirmam que registros palinológicos marinhos e terrestres referentes à bacia do rio Paraíba do Sul mostram que suas áreas montanhosas estavam cobertas por vegetação herbácea antes e durante o último período glacial. A floresta pluvial atlântica provavelmente não ocorria nessas áreas elevadas como ocorre hoje em dia. Apenas durante o final do período glacial a floresta pluvial expandiu-se, como indicado pelos registros palinológicos (BEHLING *et al.*, 2002). Nas proximidades da área de estudo, Santos (1999) também relata a ocorrência de um clima relativamente frio e seco no Pleistoceno Superior, associado a uma vegetação composta por campos abertos e florestas de altitude.

Segundo Coelho Netto (2003), no médio vale do Paraíba do Sul essas alterações paleoambientais e hidrológicas induziram um período de instabilidade morfodinâmica entre 10.000 e 8.000 anos atrás. Estudos em ambos os flancos do rifte continental, nos planaltos de Campos do Jordão, Itatiaia e Bocaina, também identificaram episódios sucessivos de degradação das encostas por movimentos de massa e intervalos de estabilidade relacionados a variações nas condições

bioclimáticas durante o Pleistoceno Superior e o Holoceno (MODENESI-GAUTTIERI, 2000; HIRUMA *et al.*, 2012).

Deste modo, as taxas de denudação apresentadas no presente trabalho refletem a média de um período marcado por flutuações climáticas, no qual os processos denudacionais não mantiveram uma intensidade constante. Durante boa parte do período de algumas dezenas de milhares de anos, correspondente a idade de exposição das amostras (Tabela 1), a área de estudo esteve submetida a um clima mais frio e seco que o atual e, possivelmente, a uma morfodinâmica distinta da vigente no período pós-glacial. No entanto, o clima úmido presente na região, pelo menos desde o final do último período glacial (MODENESI-GAUTTIERI & NUNES, 1998), não foi suficiente para gerar taxas denudacionais muito elevadas.

### *Tectônica e Estrutura*

De acordo com von Blanckenburg (2006), a tectônica ativa exerce um controle dominante sobre as taxas de denudação, sendo estas mais elevadas em áreas de rejuvenescimento da paisagem controlado por falhamento, formação de escarpamentos, rifteamento e soerguimento. Nessa mesma direção, Kong *et al.* (2007) afirmam que a atividade tectônica desempenha um papel mais importante que as variações climáticas no controle de taxas de erosão de longo-termo. Jakica *et al.* (2011) também sugerem que taxas erosivas derivadas de isótopos cosmogênicos podem ser utilizadas para avaliar as taxas relativas de atividade neotectônica, mesmo em contexto intraplaca.

Na Serra da Mantiqueira diversos autores ressaltam o expressivo papel da neotectônica na configuração do relevo (SAADI, 1991; SAADI, 1993; COSTA, 1999; SANTOS, 1999; HIRUMA *et al.*, 2001; MODENESI-GAUTTIERI *et al.*, 2002; MARQUES NETO & PEREZ FILHO, 2012). Além dos destacados desnivelamentos altimétricos e da pronunciada incisão da rede de drenagem, não é difícil encontrar outros elementos que confirmem a magnitude da tectônica neocenozoica na Serra da Mantiqueira. Um exemplo significativo são os xistos e gnaisses da Megassequência Andrelândia alçados a mais de 2350m de altitude nos pontos mais altos da Serra do Papagaio, nas proximidades de Aiuruoca. Fora dos domínios soerguidos da Mantiqueira essas mesmas unidades litológicas formam colinas suaves que nunca ultrapassam 1200m de altitude, o que mostra sua relativa fragilidade frente aos processos denudacionais.

Apesar de a área de estudo estar inserida em uma das regiões brasileiras mais ricas em evidências de atividade neotectônica, este fato não se reflete nas taxas denudacionais aqui apresentadas, já que estas são semelhantes ou até inferiores a de outros escarpamentos do sudeste brasileiro (CHEREM *et al.*, 2012; SALGADO *et al.*, 2012). As taxas encontradas na Serra da Mantiqueira também são bastante

inferiores às de outro ambiente localizado no flanco de um rifte continental, as Montanhas Rwenzori, onde Roller *et al.* (2012) mensuraram taxas entre 28 e 131 m/Ma. Ainda como parâmetro de comparação é válido citar que escarpamentos de margem passiva no Sri Lanka (VANACKER *et al.*, 2007) e no Paraná (MARENT, 2011) apresentaram taxas denudacionais de até 71 m/Ma e 48 m/Ma, respectivamente. Já em áreas de tectônica ativa, próximas a limites de placa, as taxas podem ultrapassar 1000 m/Ma (VANCE *et al.*, 2003; SAFRAN *et al.*, 2005; BINNIE *et al.*, 2010).

Como já mencionado, as taxas de denudação relativamente baixas na área de estudo devem estar parcialmente relacionadas à resistência dos granitos ali presentes. No entanto, a relativa estabilidade tectônica, também necessária para ocorrência de baixas taxas (VON BLANCKENBURG, 2006), contrasta com o relevo rejuvenescido e com as elevadas altitudes desse setor da Mantiqueira. Nesse sentido, o último evento tectônico responsável pelo rejuvenescimento da paisagem na área de estudo deve ser consideravelmente mais antigo que o limite temporal atingido pelas taxas de denudação, a ponto do ajustamento das taxas denudacionais já ter ocorrido antes do limite de detecção das amostras.

Esta hipótese encontra suporte na proposta de Costa (1999), segundo a qual o relevo da região sul de Minas Gerais evoluiu a partir de um importante evento tectônico ocorrido no fim do Neógeno, onde as principais feições topográficas estão a ele relacionadas. Para a Serra da Mantiqueira especificamente, Costa (1999) sugere uma evolução ocorrida no fim do Neógeno ou início do Quaternário, associada a falhas oblíquas ou inversas de baixo ângulo, direção N60-70E e vergentes para norte. Riccomini *et al.* (2004) também situam no intervalo Neógeno-Quaternário o segundo evento deformador do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil, sendo que neste as falhas das bordas das bacias, ativas na fase de instalação do rifte, foram reativadas com caráter transcorrente, inverso e/ou de empurrão. Nessa mesma direção, Santos *et al.* (2006) indicam a atuação de um evento tectônico no Neógeno-Quaternário, sendo este responsável pela inversão da Bacia de Aiuruoca. Saadi (1993) sugere que parte do rejeito da falha principal da Mantiqueira deve ser atribuída ao Pleistoceno e ainda propõe a ocorrência de um último pulso neotectônico no Pleistoceno Médio a Inferior, que seria responsável pelo soerguimento generalizado da Plataforma Brasileira. Valadão (2009) também registra a ocorrência de um episódio de soerguimento concentrado na fachada Atlântica, com início no Plioceno Superior.

Deste modo, é plausível supor que o último evento tectônico significativo que causou ajuste pronunciado da rede de drenagem e rejuvenescimento da paisagem, teve seus efeitos na morfogênese estendidos no máximo até o Pleistoceno Médio. A partir de então a paisagem vem evoluindo mais lentamente, a exemplo do que deve ter ocorrido em outros

momentos de relativa estabilidade tectônica ao longo do Cenozóico. Um argumento semelhante é usado por Kong *et al.* (2007) para explicar as baixas taxas de denudação estimadas através de isótopos cosmogênicos no noroeste do Tibete, sendo estas um reflexo da redução da atividade tectônica no último milhão de anos.

Portanto, as formas de relevo atuais na área de estudo devem ser uma herança direta deste evento tectônico situado no intervalo Plioceno-Pleistoceno. Daí resultaria a boa correlação verificada nas sub-bacias amostradas entre taxas de denudação e declividade, o que segundo Riebe *et al.* (2000), seria um sinal de rejuvenescimento da paisagem. Desta forma, o tectonismo deformador do Rift Continental do Sudeste do Brasil que adentra o Holoceno (RICCOMINI *et al.*, 2004) e a tectônica holocênica registrada na região da Bacia de Aiuruoca (SANTOS, 1999) não devem ter exercido influência significativa sobre a morfogênese local.

Por fim, a influência da presença de falhas e fraturas aparenta ser restrita nas taxas de denudação das sub-bacias estudadas. Uma única falha mapeada na Folha Pouso Alto (PEDROSA SOARES *et al.*, 2003) está inserida na área das sub-bacias. Esta falha de direção ENE coincide com os vales do rio Grande e do ribeirão Dois Irmãos, evidenciando a adaptação destes cursos fluviais a esta linha de fraqueza (Figura 2). No entanto, as taxas de denudação destas sub-bacias não mostram nenhum incremento significativo que possa ser atribuído a este falhamento. Essa mesma observação é válida para os demais lineamentos estruturais, que encontram-se distribuídos em todas as sub-bacias e expressam-se principalmente em segmentos retilíneos dos canais fluviais (Figura 2). Nem mesmo aqueles lineamentos mais destacados, como o presente no alto curso do ribeirão da Prata (P4), exercem influência clara nas taxas denudacionais mensuradas.

## Considerações finais

Os dados apresentados neste estudo mostram que a taxa média de denudação das sub-bacias do rio Paraíba do Sul, voltadas para o gráben, é superior a das sub-bacias do rio Grande (Paraná), voltadas para o interior continental. Esta diferenciação na intensidade dos processos denudacionais se deve ao fato das sub-bacias do rio Paraíba do Sul serem controladas por um nível de base mais baixo do que aquele verificado nas bacias interioranas. No entanto, a localização do divisor hidrográfico no topo de uma crista pronunciada cria gradientes bastante elevados em ambas as vertentes e não apenas naquela voltada para o gráben, o que se reflete na diferença relativamente reduzida entre as taxas de denudação verificadas nas duas vertentes. Deve-se ressaltar ainda o papel do escalonamento local da Serra da Mantiqueira, de modo que os cursos fluviais voltados para o gráben não são afluentes diretos do rio Paraíba do Sul, mas sim do alto rio Preto, ali abrigado em um típico vale suspenso.

Entre os fatores controladores das taxas de denudação, se destaca a correlação positiva existente entre as taxas e dois parâmetros morfométricos: amplitude de relevo e declividade média das sub-bacias. A influência da litologia também se mostra importante, já que a resistência dos granitos frente aos processos erosivos é um dos fatores que condiciona taxas denudacionais bastante baixas na área. Os resultados indicam que o granito Maromba é a unidade litológica mais resistente entre aquelas presentes nas sub-bacias amostradas. O controle exercido por fatores climáticos, principalmente através de efeitos orográficos, é incerto, no entanto, é possível que a maior pluviosidade da vertente voltada para o gráben tenha alguma influência nas taxas denudacionais mais elevadas ali verificadas.

As taxas de denudação mensuradas na área de estudo são relativamente baixas, atingindo uma média geral de apenas 14,53 m/Ma. Estas baixas taxas, referentes às últimas dezenas de milhares de anos, contrastam com o relevo rejuvenescido e com as elevadas altitudes desse setor da Mantiqueira, onde há um reconhecido papel da neotectônica na morfogênese. Deste modo, é provável que tenha havido uma atenuação da atividade tectônica no Quaternário Superior, com a consequente estabilização dos níveis de base e diminuição dos processos denudacionais. Portanto, os dados apresentados neste trabalho corroboram as observações de von Blanckenburg (2006), segundo as quais a amplitude topográfica por si só não resulta em altas taxas de denudação, sendo necessário para isso um rejuvenescimento da paisagem acionado por atividade tectônica.

## Agradecimentos

Os autores desse artigo agradecem ao CNPq (Projeto 561715/2008-4), à FAPEMIG (Projeto APQ 00507-08), à Capes, ao CNRS (França) e a Cooperação CAPES/COFECUB pelo apoio financeiro. Agradecem ainda aos pesquisadores do CEREGE Maurice Arnold, Georges Aumaître e Karim Ked pelo apoio nos laboratórios daquela instituição. Por fim, agradecem ao Bruno Débian e a Nívia Melo pelo apoio do Laboratório de Geomorfologia da Universidade Federal de Minas Gerais.”

## Referências bibliográficas

- ABBÜHL, L. M.; NORTON, K. P.; SCHLUNEGGER, F.; KRACHT, O.; ALDAHAN, A.; POSSNERT, G. El Niño forcing on <sup>10</sup>Be-based surface denudation rates in the northwestern Peruvian Andes. *Geomorphology*, v. 123, p. 257–268, 2010.
- ABBÜHL, L. M.; NORTON, K. P.; JANSEN, J. D.; SCHLUNEGGER, F.; ALDAHAN, A.; POSSNERT, G. Erosion rates and mechanisms of knickzone retreat inferred from <sup>10</sup>Be measured across strong climate gradients on the northern and central Andes Western Escarpment. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 36, p. 1464-1473, 2011.

- ALMEIDA, M. E. Geologia, *Petrografia e geoquímica do leucogranito Capivara, Itamonte (MG)*. 1996. 128 f. Tese (Mestrado em Ciências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.
- BEHLING, H.; ARZ, H. W.; PÄTZOLD, J.; WEFER, G. Late Quaternary vegetational and climate dynamics in southeastern Brazil, inferences from marine cores GeoB 3229-2 and GeoB 3202-1. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 179, n. 3-4, p. 227–243, 2002.
- BIERMAN, P. R.; CAFFEE, M. Slow rates of rock surface erosion and sediment production across the Namib Desert and escarpment, southern Africa. *American Journal of Science*, v.301, n. 4-5, p. 326-358, 2001.
- BINNIE, S. A.; PHILLIPS, W. M.; SUMMERFIELD, M. A.; FIFIELD, L. K.; SPOTILA, J. A. Tectonic and climatic controls of denudation rates in active orogens: The San Bernardino Mountains, California. *Geomorphology*, v. 118, p. 249-261, 2010.
- CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C.; BRAUCHER, R.; BOURLÈS, D.; SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, C. A. Long-term evolution of denudational escarpments in southeastern Brazil. *Geomorphology*, v. 173-174, p. 118-127, 2012.
- COELHO NETTO, A. L. Evolução de cabeceiras de drenagem no médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): bases para um modelo de formação e crescimento da rede de canais sob controle estrutural. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 4, n.2, p. 69-100, 2003.
- COSTA, R. D. *Determinação dos campos de tensão cenozóicos na região sul de Minas Gerais*. 1999. 135 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.
- ETCHEBEHERE, M. L. C.; CASADO, F. C.; MORALES, N. Análise fluviomorfológica do rio Corumbataí (SP) - implicações morfotectônicas associadas à migração de nickpoint. *Revista Geociências - UnG*, v.10, n.1, p. 74-94, 2011.
- FLEMING, A.; SUMMERFIELD, M. A.; STONE, J. O.; FIFIELD, K.; CRESSWELL, R. G. Denudation rates for the southern Drakensberg escarpment, SE Africa, derived from in-situ-produced cosmogenic <sup>36</sup>Cl: initial results. *Journal of the Geological Society*, London, v. 156, p. 209–12, 1999.
- GALLEN, S. F.; WEGMANN, K. W.; FRANKEL, K. L.; HUGHES, S.; LEWIS, R. Q.; LYONS, N.; PARIS, P.; ROSS, K.; BAUER, J. B.; WITT, A. C. Hillslope response to knickpoint migration in the Southern Appalachians : implications for the evolution of post – orogenic landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 36, n. 9, 2011.
- HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS NETO, M. C.; SILVA, L. C.; TROUW, R. A. J.; JANASI, V. A. Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B.; (org) *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, São Paulo: Beca, 2004. p. 203-234.
- HEIMSATH, A. M.; CHAPPELL, J.; FINKEL, R. C.; FIFIELD, K.; ALIMANOVIC, A. Escarpment erosion and landscape evolution in southeastern Australia. *Geological Society of America Special Paper*, v. 398, p. 173-190, 2006.
- HIRUMA, S. T.; RICCOMINI, C.; MODENESI-GAUTTIERI, M. C. Neotectônica no Planalto de campos do Jordão, SP. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 31, n. 3, p.375-384, 2001.
- HIRUMA, S. T.; MODENESI-GAUTTIERI, M. A. Y. C.; RICCOMINI, C. Late Quaternary colluvial deposits in the Bocaina Plateau, southeastern Brazil highlands: age and palaeoenvironmental consequences. *Boreas*, p. 1–11, 2012.
- HIRUMA, S. T.; RICCOMINI, C.; MODENESI-GAUTTIERI, M. C.; HACKSPACHER, P. C.; HADLER-NETO, J. C.; FRANCO-MAGALHÃES, A. O. B. Denudation history of the Bocaina Plateau, Serra do Mar, southeastern Brazil: Relationships to Gondwana breakup and passive margin development. *Gondwana Research*, v. 18, p. 674-687, 2010.
- JAKICA, S.; QUIGLEY, M. C.; SANDIFORD, M.; CLARK, D.; FIFIELD, L. K.; ALIMANOVIC, A. Geomorphic and cosmogenic nuclide constraints on escarpment evolution in an intraplate setting, Darling Escarpment, Western Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 36, n. 4, p. 449–459, 2011.
- KOUNOV, A.; NIEDERMANN, S.; DE WIT, M. J.; VIOLA, G.; ANDREOLI, M.; ERZINGER, J. Present denudation rates at selected sections of the South African escarpment and the elevated continental interior based on cosmogenic <sup>3</sup>He and <sup>21</sup>Ne. *South African Journal of Geology*, v. 110, p. 235 – 248, 2007.
- KONG, P.; NA, C.; FINK, D.; DING, L.; HUANG, F. Erosion in northwest Tibet from in-situ-produced cosmogenic <sup>10</sup>Be and <sup>26</sup>Al in bedrock. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 32, p. 116–125, 2007.
- MARENT, B. R. *Mensuração dos processos desnudacionais a longo-termo (<sup>10</sup>Be) na Serra do Mar no Estado do Paraná: implicações para a evolução do relevo*. 2011. 107 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- MARQUES NETO, R.; PEREZ FILHO, A. Relevos tectônicos no meio tropical: questões sobre a fisiologia da paisagem nas terras altas do sudeste brasileiro. *Geonorte*, v. 2, n. 4, p. 646-658, 2012.
- MATMON, A.; BIERMAN, P.; LARSEN, J.; SOUTHWORTH, S.; PAVICH, M. FINKEL, R.; CAFFEE, M. Erosion of an ancient mountain range, the Great Smoky Mountains, North Carolina and Tennessee. *American Journal of Science* v.303, p. 817–855, 2003.
- MODENESI-GAUTTIERI, M. C. Hillslope deposits and the Quaternary evolution of the altos campos – Serra da Mantiqueira, from Campos do Jordão to the Itatiaia Massif. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 3, p. 508–514, 2000.
- MODENESI-GAUTTIERI M. C.; NUNES L. H. Processes geocriogênicos quaternários nas cimeiras da Mantiqueira, com considerações climáticas. *Revista do Instituto Geológico*, v. 19, n. 1-2, p. 19-30, 1998.
- MODENESI-GAUTTIERI, M. C.; HIRUMA, S. T.; RICCOMINI, C. Morphotectonics of a high plateau on the northwestern flank of the Continental Rift of southeastern Brazil. *Geomorphology*, v. 43, p. 257 – 271, 2002.
- MOREIRA, I. C.; MELLO, C. L.; FERNANDES, N. F. Aplicação de modelo matemático de evolução do relevo na simulação do recuo da escarpa de porção da Serra da

- Mantiqueira, Resende/Itatiaia (RJ). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 9., 2012, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: UGB, 2012. CD-ROM.
- PEDROSA SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; TROUW, R. A. J.; HEILBRON, M. (Org.). *Geologia e Recursos Minerais do Sudeste Mineiro, Projeto Sul de Minas- Etapa I*. Belo Horizonte: COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, 2003. CD-ROM.
- PORTENGA, E. W.; BIERMAN, P. R. Understanding Earth's eroding surface with  $^{10}\text{Be}$ . *GSA Today*, v. 21, n. 8, p. 4–10, 2011.
- RICCOMINI, C. *O Rift continental do Sudeste do Brasil*. 1989. 256 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A. CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Ed.). *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 2004. p. 383-405.
- RIEBE, C. S.; KIRCHNER, J. W.; GRANGER, D. E.; FINKEL, R. C. Erosional equilibrium and disequilibrium in the Sierra Nevada, inferred from cosmogenic  $^{26}\text{Al}$  and  $^{10}\text{Be}$  in alluvial sediment. *Geology*, v. 28, n. 9, p. 803-806, 2000.
- ROLLER, S.; WITTMANN, H.; KASTOWSKI, M.; HINDERER, M. Erosion of the Rwenzori Mountains, East African Rift, from in situ-produced cosmogenic  $^{10}\text{Be}$ . *Journal of Geophysical Research*, v. 117, n. F3, 2012.
- SAADI, A. *Ensaio Sobre a Morfotectônica de Minas Gerais - tensões intra-placa, descontinuidades crustais e morfogênese*. 1991. 285 f. Tese (Prof. Titular) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1991.
- SAADI, A. Neotectônica da Plataforma Brasileira: esboço e interpretações preliminares. *Geonomos*, v. 1, n. 1, p. 1-15, 1993.
- SAFRAN, E. B.; BIERMAN, P. R.; AALTO, R.; DUNNE, T.; WHIPPLE, K. X.; CAFFEE, M. Erosion rates driven by channel network incision in the Bolivian Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 30, p. 1007–1024, 2005.
- SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, C. A. C.; COLIN, F.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, A. F. D. C.; NALINI JR, H. A. Study of the erosion rates in the upper Maracujá Basin (Quadrilátero Ferrífero/MG, Brazil) by the in situ produced cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  method. *Earth Surface Process and Landforms*. v. 32, n. 6, p. 905-911, 2007.
- SALGADO, A. A. R.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, C. A. C.; COLIN, F.; VARAJÃO, VARAJÃO, A. F. D. C.; NALINI JR, H. A. Relief evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brazil) by means of ( $^{10}\text{Be}$ ) cosmogenic nuclei. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 52, n.3, p. 317-323, 2008.
- SALGADO, A. A. R.; SOBRINHO, L. C.; CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C.; BOURLÈS, D.; BRAUCHER, R.; MARENT, B. R. Estudo da evolução da escarpa entre as bacias do Doce/Paraná em Minas Gerais através da quantificação das taxas de desnudação. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 13, n. 2, p. 213-221, 2012.
- SANT'ANNA NETO, J. L. Decálogo da climatologia do sudeste brasileiro. *Revista Brasileira de Climatologia*, Rio de Janeiro, v.1, p. 43-60, 2005.
- SANTOS, M. *Serra da Mantiqueira e Planalto do Alto Rio Grande: a bacia terciária de Aiuruoca e evolução morfotectônica*. 1999. 134 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.
- SANTOS, M.; HASUI, Y.; MORALES, N.; LADEIRA, F. S. B. A Bacia Terciária de Aiuruoca: contribuição para o entendimento da evolução cenozóica do Sul de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO DO CRETÁCEO DO BRASIL e SIMPÓSIO DO TERCIÁRIO DO BRASIL, 7-1., 2006, Serra Negra. *Boletim do 7º Simpósio do Cretáceo do Brasil/1º Simpósio do Terciário do Brasil*. Rio Claro: Perinotto et al. (Eds.), 2006. p. 114.
- SANTOS, R. F. Vegetação, uso e ocupação da terra. In: SANTOS, A. A. (ed.). *O Parque Nacional do Itatiaia*. Rio de Janeiro: FBDS, 2000.
- SEIDL, M.; FINKEL, R.; CAFFEE, M. W.; HUDSON, G. B.; DIETRICH, W. E. Cosmogenic Isotope Analyses Applied to River Longitudinal Profile Evolution: Problems and Interpretations. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 22, p. 195–209, 1997.
- SULLIVAN, C. *Using  $^{10}\text{Be}$  to investigate the long term behavior of the Blue Ridge Escarpment*. 2007. 65 f. Thesis (Master of Science - Specializing in Geology) - The University of Vermont, Vermont, 2012
- TROUW, R. A. J.; RIBEIRO, A.; PACIULLO, F. V. P. Geologia da Folha Pouso Alto. In: PEDROSA SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; TROUW, R. A. J.; HEILBRON, M. (Org.). *Geologia e Recursos Minerais do Sudeste Mineiro, Projeto Sul de Minas-Etapa I*. Belo Horizonte: COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, 2003. CD-ROM.
- VALADÃO, R. C. Geodinâmica de Superfícies de Aplanamento, Desnudação Continental e Tectônica Ativa como condicionantes da Megageomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.10, n. 2, p. 77-90, 2009.
- VANACKER, V.; VONBLANCKENBURG, F.; HEWAWASAM, T.; KUBIK, P. W. Constraining landscape development of the Sri Lankan escarpment with cosmogenic nuclides in river sediment. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 253, n. 3-4, p. 402-414, 2007.
- VANCE, D.; BICKLE, M.; IVY-OCHS, S.; KUBIK, P. W. Erosion and exhumation in the Himalaya from cosmogenic isotope inventories of river sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 206, p. 273–288, 2003.
- VOGT, H.; UFIMTSEV, G.; SAADI, A. Morfotectônica comparada de rifts: Lago Baikal, Fossa do rio Réno e fossa do médio rio Paraíba do Sul. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 5, 1995, Gramado. *Boletim de Resumos Expandidos*. São Paulo: SBG, 1995. p. 444-445.
- VON BLANCKENBURG, F. The control mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 242, n. 3-4, p. 224-239, 2006.